

Modelagem de parâmetros biofísicos de povoamentos de *Eucalyptus* através da interferometria e radiometria SAR (bandas X e P)

Fábio Furlan Gama¹
João Roberto dos Santos¹
José Cláudio Mura¹
Rafael Hardt Araújo²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos – SP – Brasil
CEP: 12.227- 010, Fax: (12) 3945 6468

²Nobrecel S/A Celulose e Papel
Estrada Vereador Abel Fabrício Dias, Km 155, Pindamonhangaba – SP – Brasil
CEP: 12445-010, Fax : (12) 3643 1337
{fabio, mura}@dpi.inpe.br; jroberto@dsr.inpe.br; rafael@nobrecel.com.br

Abstract. The main goal of this paper was to establish the relationship between the forest dendrometric parameters and the interferometric and radiometric image response, obtained from a SAR sensor (Synthetic Aperture Radar), using multivariable regression techniques. A 6,1 year old *Eucalyptus grandis* populated area was selected for the study. The results pointed out that the stand volume was highly correlated with the interferometric height logarithm (LogHint), obtained by the difference between interferometric models in X and P bands, whereas the DBH presented better relationship with the combination of VV coherence (CohPvv) and the LogHint. The total vegetation height, similar to the DBH, was better explained by the combination of CohPvv and LogHint. The results showed that due to the fact that the population of individuals whose structure was predominantly cylindrical and vertically oriented, caused a higher interaction with the vertical polarization. The higher wavelength P band radiometry efficacy wasn't as good as the interferometry (CohPvv and LogHint) to estimate the dendrometric parameters studied, which obtained 84 to 88% of determination coefficient in relation to the area forest inventory.

Palavras-chave: SAR, interferometry, polarimetry, forest inventory, SAR, interferometria, polarimetria, inventário florestal.

1. Introdução

O Sensoriamento Remoto por microondas tem-se mostrado uma ferramenta muito útil para a caracterização, inventário e monitoramento florestal. A pouca dependência das condições climáticas e de iluminação solar tem feito do imageamento radar uma solução eficiente no mapeamento de áreas que apresentam freqüente cobertura de nuvens.

A utilização de radar para estimar determinados parâmetros biofísicos e, por conseguinte, obter um maior conhecimento fisionômico-estrutural da vegetação tem sido intensificada nos últimos anos, principalmente devido às formas de interação que o sinal de microondas possui com a vegetação e sobretudo com as melhorias tecnológicas oferecidas, como polarimetria, interferometria e uma melhor qualidade da radiometria radar.

Estudos realizados por Beaudoin et al. (1994) em florestas de *Pinus sp* (floresta de Landes-França), durante a campanha Maestro-1, utilizando o radar do JPL/NASA nas bandas P, L e C, verificaram que a resposta radiométrica do radar na banda P em todas as polarizações, foi a que apresentou os melhores coeficientes de correlação, para a biomassa dos galhos, troncos, acículas e total. Verificou-se também que a banda P, na polarização HH, apresentou altos valores de coeficientes de correlação com os parâmetros estruturais da floresta, principalmente para o diâmetro à altura do peito (DAP) e área basal. A resposta radiométrica da banda P nas polarizações VV e HH foi maior devido provavelmente à alta penetração nas

copas das árvores e a conseqüente ocorrência dos mecanismos de *double-bounce* nos troncos das árvores, principalmente na polarização HH.

Neeff et al. (2005) combinaram a técnica descrita por Mura et al. (2001), para obter a altura da floresta através da diferença do DEM obtido pela interferometria nas bandas X (baixa penetração no dossel) e P (alta penetração) para determinar a biomassa da vegetação, que permitiu obter um modelo de regressão com um índice de determinação de 88 %, ao invés 77 % obtido por Santos et al. (2003) para o mesmo conjunto de dados, que empregaram apenas a resposta radiométrica da banda P-HH. Gama et al. (2005), utilizando o mesmo conjunto de dados, conseguiram obter um modelo de regressão para o volume da floresta tropical empregando a resposta radiométrica da banda P na polarização HH, bem como verificou-se que o modelo de regressão do logaritmo da biomassa da vegetação, poderia obter um índice R^2 mais elevado por linearizar esta variável.

Em cooperação com as empresas Orbisat Aerolevantamentos S.A. e Nobrecel Celulose e Papel S.A., o INPE realizou uma campanha empregando um radar tipo SAR aerotransportado (Synthetic Aperture Radar) na banda P ($\lambda = 72$ cm) multipolarizada (HH, HV, VH, VV), e na banda X ($\lambda = 3$ cm) numa área de reflorestamento de *Eucalyptus*, de forma a obter um melhor entendimento da interação do sinal de microondas com os parâmetros estruturais do povoamento (Gama et al., 2006). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a relação de resposta do radar, quanto a radiometria (σ^0) na banda P nas quatro polarizações, a interferometria e as coerências interferométricas nas bandas X e P, com os parâmetros biofísicos (altura, DAP e volume) de povoamentos de *Eucalyptus*.

2. Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Pindamonhangaba/SP, em uma área de reflorestamento, composta por talhões de *Eucalyptus grandis*, de 6 anos de idade, com altura média de 23 metros, numa área plantada de 128 hectares, em relevo plano, constituído de dois platôs altimétricos distintos. A Figura 1 apresenta a imagem obtida na banda X, obtida no aerolevantamento por radar em dezembro de 2004. O voo de mapeamento foi realizado a cerca de 4.000 m de altitude, em duas direções de voo para minimizar os efeitos de sombra e *layover* nas imagens.

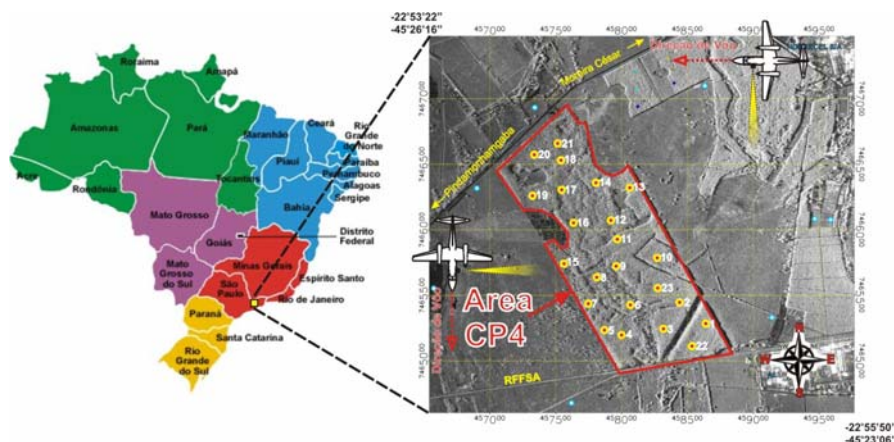


Figura 1. Área de estudo com a localização das parcelas inventariadas.

3. Materiais e métodos

Foram realizados inventários florestais em *transectos* na região de estudo, com medidas da altura das árvores, do DAP e do volume, em indivíduos cujo diâmetro fosse superior a 5,0 cm. A medida de biomassa da vegetação foi obtida através de métodos destrutivos, empregando as medidas do inventário para a escolha da árvore representativa da parcela. A

localização das 23 parcelas na área pode ser observada na Figura 1, em que os círculos amarelos correspondem ao centro das parcelas.

Além do inventário florestal, foram realizadas 1221 medidas topográficas empregando uma estação total marca Topcon 701 com precisão de 3", no interior das parcelas e 98 medidas nas áreas de pasto no entorno do povoamento. Neste levantamento manteve-se um limiar de erro máximo de 5cm para todas as medidas realizadas.

Para permitir a calibração de fase da interferometria e de georeferenciamento foi necessária a implantação de refletores de canto. Os círculos azuis na Figura 1 representam a localização dos refletores utilizados durante o imageamento radar, necessários ao mapeamento interferométrico.

As imagens geradas pelo radar sofreram calibração polarimétrica e radiométrica que transformam a imagem radar em uma imagem *sigma nought* (σ^0). A calibração polarimétrica das imagens foi realizada através do programa RAT (Radar Tools), e na calibração radiométrica empregou-se um programa desenvolvido em linguagem IDL que utiliza a resposta dos refletores de canto como referência para obter o fator de calibração da cena.

A partir das respostas radiométricas das imagens complexas calibradas polarimetricamente, foram geradas as medidas de entropia e do ângulo α , obtidas a partir de uma série de decomposições de matrizes, que caracterizam o tipo de espalhamento predominante. Foram calculados os índices desenvolvidos por Pope et al. (1994) a partir dos dados calibrados. Uma vez obtidos os dados interferométricos das bandas P e X, as coerências polarimétricas, as imagens σ^0 polarimétricas, a altura interferométrica (Hint), os índices BMI, CSI, VSI e ITI, o ângulo α , a Entropia e a Anisotropia, foram empregadas técnicas de regressão múltipla para a escolha das variáveis candidatas aos modelos.

Os modelos digitais de elevação do terreno (DEM) foram gerados por interferometria SAR para cada polarização da banda P e um DEM para a banda X na polarização HH. A altura interferométrica (Hint) foi obtida pela diferença do DEM da banda X, relativo à altura do dossel, e o DEM da banda P na polarização HH, relativo à altura do solo.

Para a determinação do conjunto das variáveis que poderiam contribuir para a regressão, foram utilizados critérios de escolha de variáveis sugeridos por Neter et al.(1996), como o índice de determinação (R^2), o índice de determinação ajustado (R^2_a), o critério C_p , e o critério *Stepwise*. O índice R^2_a emprega uma ponderação para a medida de ajustamento da regressão, sendo mais relevante do que o índice R^2 . O critério C_p envolve o conceito do erro quadrático médio total de cada subconjunto de modelos de regressão ajustado, o qual considera o erro total em cada valor ajustado. Com o critério C_p pode-se identificar subconjuntos de variáveis dependentes nos quais o erro quadrático médio total é pequeno, ou seja, quando o valor de C_p for igual ou próximo ao número de parâmetros p , corresponderá ao modelo com menor viés. O procedimento *forward stepwise* consiste acrescentar gradualmente uma nova variável ao modelo, e retirar aquela cuja contribuição parcial não foi considerada significativa através de um teste F.

Para a avaliação da heterocedasticidade (constância da variância dos resíduos) foi empregado o teste de Levene, que realiza a comparação do teste *t* de dois subgrupos de amostras do conjunto de dados, para determinar se a média dos desvios absolutos de um subgrupo difere do outro.

Para a avaliação da existência de *outliers* no conjunto de dados, empregou-se o método de distância de Cook, que considera a influência de uma determinada observação em todos os outros valores ajustados. Um caso é considerado um *outlier* quando o seu percentil de uma distribuição F ultrapassa 20%.

Para a validação de modelos para conjuntos de dados pequenos, pode ser utilizado o critério PRESS (soma de quadrados da predição) como uma forma para avaliar a predição do modelo. O critério funciona eliminando-se o *i*-ésimo caso do conjunto de dados, estimando a

função de regressão com as observações restantes e, então, usando a equação de regressão ajustada, obter o valor predito. A soma quadrática de todos esses n erros de predição define o valor de PRESS. Segundo Neter et al. (1996), a proximidade entre os valores de PRESS e SSE (soma de quadrados dos resíduos), indica que o MSE (média da soma dos quadrados dos resíduos) pode ser um indicador razoável da capacidade preditiva do modelo. Segundo Neter et al., 1996, é possível obter uma estimativa do desvio padrão do modelo a partir de novas observações, empregando a função da matriz de variância/covariância dos coeficientes estimados no modelo de regressão

4. Resultados

4.1 Modelos de regressão

Durante o desenvolvimento do modelo de regressão para a altura total, os critérios R^2 , R^2_a , Cp e Stepwise para a seleção das variáveis explicativas indicou que os modelos de regressão para o DAP e Altura total necessitam de duas variáveis (LogHint e CohPvv) enquanto que o modelo do Volume da vegetação empregou apenas uma variável (LogHint). A Tabela 1 apresenta o resultado dos modelos obtidos com os correspondentes coeficientes de determinação.

Tabela 1 – Modelos de regressão obtidos.

Variáveis	Modelo de regressão	R^2 (%)	R^2_a (%)
DAP	$1,4657 + 16,6123 * \text{LogHint} - 13,6849 * \text{CohPvv}$	85,90	84,42
Altura Total	$7,049 + 17,0131 * \text{LogHint} - 11,7418 * \text{CohPvv}$	86,10	84,55
Volume	$- 314.035 + 427.946 \text{ Log } H_{\text{int}}$	83,53	82,70

O teste de distância de Cook para verificação de existência de *outliers* indicou a presença de um caso, para o modelo do DAP. Para o modelo da Altura total foi identificado por este teste dois casos de outliers, já o modelo do Volume da vegetação foram identificados quatro casos, conforme se observa na Tabela 2.

Os resíduos dos modelos de regressão apresentaram-se com uma tendência à normalidade pelos testes empregados, apresentando homocedasticidade pelo teste de Levene. A Tabela 2 apresenta o resultado dos modelos de regressão e o seu correspondente erro de predição obtido a partir do valor de MSE.

Tabela 2 – Resultado dos modelos de regressão.

Modelo:	Outliers	Homoce-dasticidade	PRESS	SSE	MSE	Erro predição
DAP	Parcela 4	OK	25,099	17,2798	0,909	0,954 cm
Altura Total	Parcelas 4 e 8	OK	26,78	17,88	0,99	0,995m
Volume	Parcelas 4, 6, 9, 19	OK	26840,1	22532,7	1126,6	33,56 m ³ /ha

A validação do modelo do DAP pelo critério PRESS, cujo valor correspondeu a 25,099, mostrando-se 45,25% maior que o do SSE (17,2798), desta forma o valor de MSE foi empregado para obter o erro de predição de 0,954 cm. Este erro de predição correspondeu a 7,56 % se comparado com o DAP médio das árvores (12,62cm); e 3,73 % se comparado com o DAP máximo de 25,60cm.

A validação do modelo da altura total pelo critério PRESS, cujo valor correspondeu a 26,78, mostrando-se 49,78% maior que o do SSE (17,88), desta forma o valor de MSE foi empregado para obter o erro de predição de 0,995m. Este erro de predição correspondeu a 5,31 %, se comparado com a altura média das árvores (18,75m); e 4,28 % se comparado com a altura máxima de 23,31m.

A validação do modelo do volume da vegetação pelo critério PRESS, cujo valor correspondeu a 26840,1, mostrando-se 19,12% maior que o do SSE (22532,7), desta forma o valor de MSE foi empregado para obter o erro de predição de 33,56 m³/ha. O erro de predição em relação ao volume médio das árvores (186,33 m³/ha) correspondeu a 18,01 %; enquanto para o volume máximo de 318,13 m³/ha, o erro de predição correspondeu a 10,55%.

Analisando o comportamento do modelo de regressão do DAP, verifica-se que ele apresentou um comportamento inversamente proporcional quanto a CohPvv e o DAP (Figura 2a). Isto ocorreu devido às variáveis CohPvv e LogHint apresentaram uma correlação de 53%, que causou a inversão do comportamento da variável CohPvv frente o DAP. Devido à contribuição da variável CohPvv ser expressiva no modelo (acrécimo de ~19% em relação ao R²), ela foi mantida no modelo preditivo para um melhor ajustamento aos dados.

Comparando o comportamento do modelo de regressão do DAP frente às medidas do inventário florestal (Figura 2b), verifica-se uma boa concordância com os dados inventariais quanto à média, não ultrapassando os valores do desvio padrão do inventário de campo. O valor obtido pelo modelo que mais se distancia dos inventário de campo corresponde ao *outlier* detectado (parcela 4), que não foi utilizado no modelo de regressão.

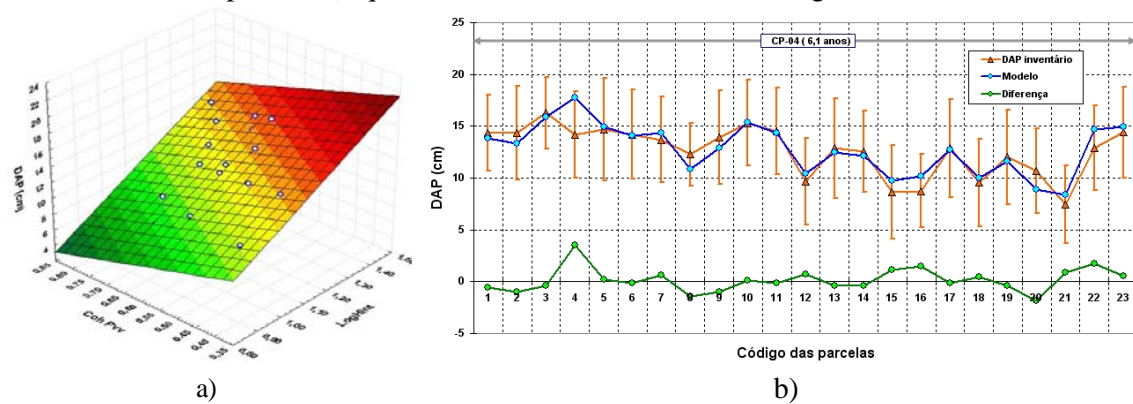


Figura 4 - a) Resultado do modelo do DAP; b) resultado do modelo com o inventário florestal

Comparando o comportamento do modelo de regressão da altura total com os dados do inventário para cada parcela estudada, verificou-se que houve uma boa concordância com a média dos dados inventariais, não ultrapassando os valores do desvio padrão das alturas totais, conforme se observa na Figura 2a. Os valores do modelo que mais se distanciaram dos dados do inventário correspondem aos dois casos detectados como *ouliers*, que não foram utilizados no modelo de regressão.

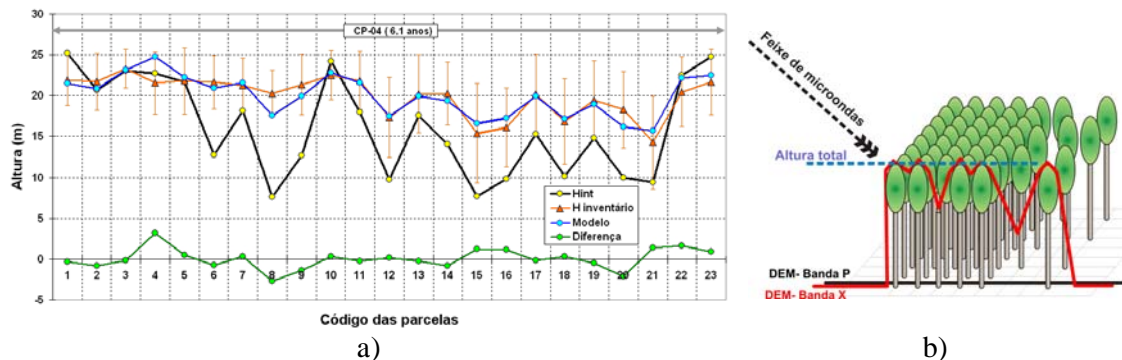


Figura 3 – a) Resultado do modelo da altura total; b) DEM nas bandas X e P.

Verifica-se também no gráfico da Figura 3a que a variável altura interferométrica (Hint) apresentou uma elevada variância para as diferentes parcelas, distanciando-se do valor da altura total média do inventário e em vários casos ultrapassando o desvio padrão das medidas,

indicando que a variável Hint isoladamente não representou satisfatoriamente a altura total da vegetação estudada.

A análise do percentual de falhas do povoamento de cada parcela frente ao desvio padrão indicou uma correlação linear de ~28% de R^2 . A possível razão deste efeito seria de que o modelo de elevação do dossel foi melhor discriminado pela banda X nas áreas de menor incidência de falhas, enquanto que nas parcelas de elevado valores de falhas conduziu à maiores diferenças do modelo de elevação, conforme ilustrado na Figura 3b.

O gráfico da Figura 3a apresenta o resultado do modelo de regressão do DAP, em que se verifica que o modelo apresentou um comportamento inversamente proporcional quanto a CohPvv e o DAP. Isto ocorreu devido às variáveis CohPvv e LogHint apresentarem uma correlação de 53%, que causou a inversão do comportamento da variável CohPvv frente o DAP. Devido à contribuição da variável CohPvv ser expressiva no modelo (acréscimo de ~19% em R^2), ela foi mantida no modelo preditivo para um melhor ajustamento aos dados.

A Figura 4a apresenta os resultados do modelo de regressão do volume da vegetação, em que se verifica uma boa linearidade do modelo final. Comparando o resultado do modelo com os dados do inventário florestal (Figura 4b), verifica-se em alguns casos, que os valores do modelo se afastam do inventário, cujas maiores diferenças corresponderam aos casos detectados como *ouliers* que foram eliminados da regressão.

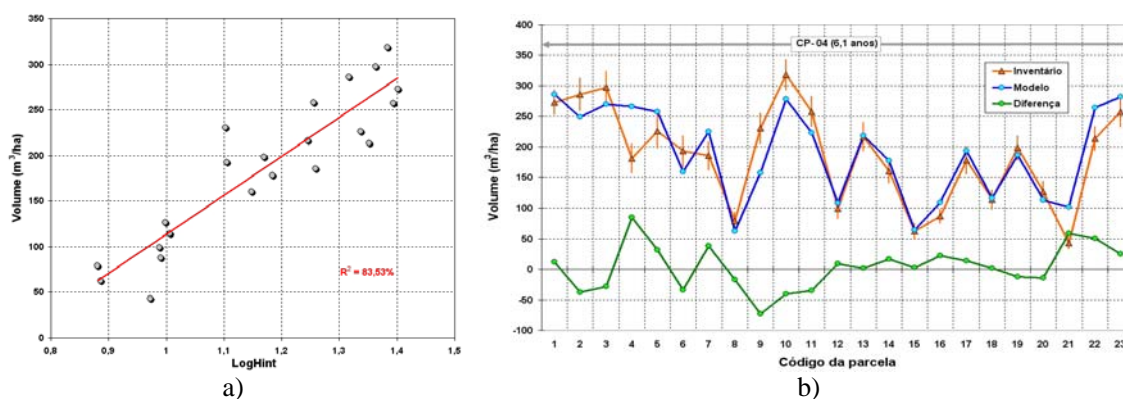


Figura 4 – a) Resultado do modelo do volume; b) Modelo do volume e o inventário florestal.

4.2 Modelos numéricos preditivos:

Baseado no modelo de regressão obtido foi gerado um modelo numérico relativo à altura total da vegetação, utilizando as imagens CohPvv e o LogHint, obtendo uma imagem final cujos valores dos pixels correspondem aos valores numéricos da regressão. Para a visualização dos resultados foi realizada uma combinação de dados da imagem do modelo de regressão e a resposta radiométrica na banda X, empregando a técnica IHS. O resultado da transformação pode ser observado na imagem hipsométrica da Figura 5a, juntamente com uma escala de cores que corresponde à altura total das árvores.

Verifica-se pelos gradientes de cor da imagem obtida que o povoamento possui uma predominância nas alturas de ~14 e de ~20 metros. As regiões da imagem na cor azul correspondem à altura nula, decorrente das falhas do povoamento.

A partir do modelo de regressão obtido foi possível gerar uma imagem relativa ao desvio padrão do modelo (Figura 3b), em que os níveis de cinza foram fatiados em cinco faixas de valores e associados a diferentes cores. Verifica-se que o desvio padrão predominante foi na faixa de 1,0 a 1,5 metros; com alguns casos na faixa de 2,0 a 2,5 metros nas áreas de grande ocorrência de falhas. Como a altura total média das árvores do povoamento era de 18,75m, o desvio padrão predominante (1,0 a 1,5m) correspondeu a um erro de estimativa na faixa de 5,33% a 8,00%.

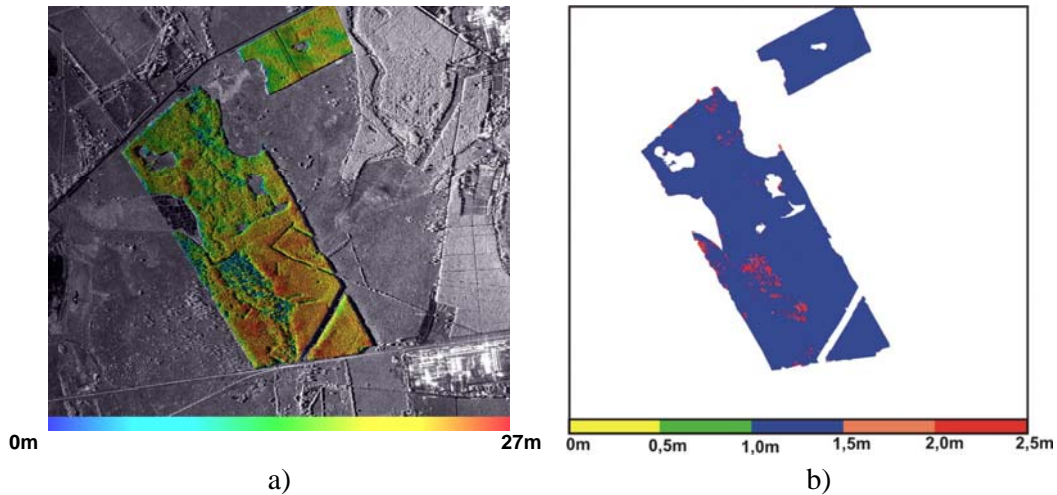


Figura 5 – Imagem: a) IHS (I=banda X, H=modelo Altura, S=50%); b) desvio padrão.

Empregando o modelo obtido, pode-se gerar um modelo numérico relativo ao DAP da vegetação, utilizando a $CohP_{VV}$ e o LogHint, obtendo uma imagem cujos valores dos *pixels* correspondem aos valores numéricos da regressão, com uma resolução espacial de 1,9 metro. Para a visualização dos resultados foi realizada uma combinação de dados da imagem do modelo de regressão com a resposta radiométrica na banda X, empregando a técnica IHS. O resultado da transformação pode ser observado na imagem hipsométrica da Figura 5a, juntamente com uma escala de cores que corresponde à altura total das árvores.

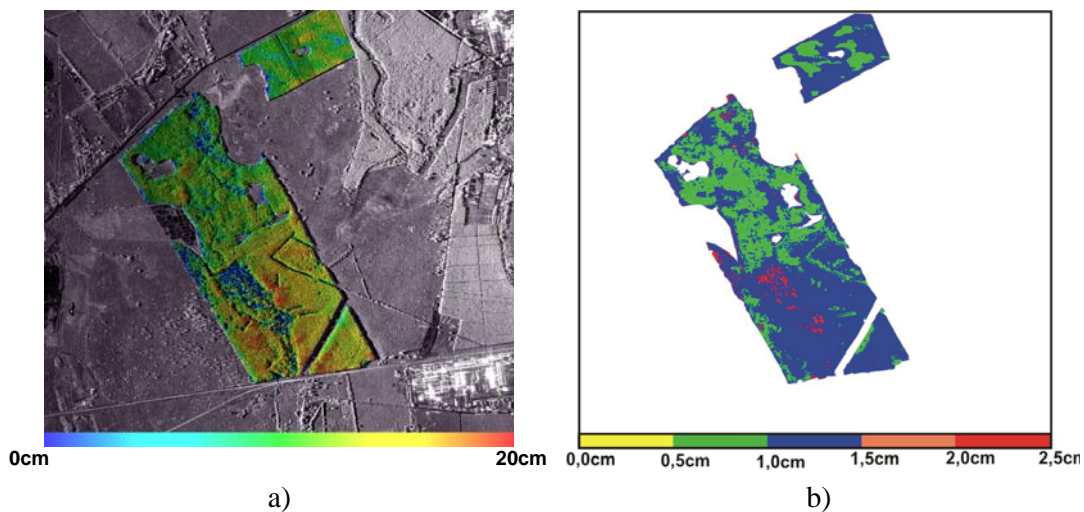


Figura 6 – Imagem: a) IHS (I= banda X, H= modelo DAP, S= 50%); b) desvio padrão.

Verifica-se pela Figura 5a, que parte do povoamento possui uma predominância nos valores de DAP de ~10cm a ~15cm. As regiões da imagem na cor azul correspondem a valores de DAP nulo, decorrente das falhas do povoamento.

A imagem relativa ao desvio padrão do modelo empregando o método sugerido por Neter et al. (1996), pode ser observada na Figura 6b, em que os níveis de cinza foram fatiados em cinco faixas de valores e associados a diferentes cores. Verifica-se que o desvio padrão predominou nas faixas de 0,5 a 1,0 cm e de 1,0 a 1,5 cm. Como o DAP médio das árvores do povoamento foi de 12,62 cm, o desvio padrão nos valores 0,5 a 1,5 cm corresponde a um erro de estimativa na faixa de 3,96% a 11,88%. Analisando erro de estimativa pelo DAP máximo das árvores (25,60 cm) o erro corresponde a uma faixa de 1,95% a 5,86%. Empregando o modelo de volume obtido, pode-se gerar um modelo numérico relativo ao volume da

vegetação, obtendo-se uma imagem cujos valores dos pixels correspondem aos valores numéricos da regressão.

Para a visualização dos resultados foi realizada uma combinação de dados da imagem do modelo de regressão com a resposta radiométrica na banda X, empregando a técnica IHS. O resultado da transformação pode ser observado na imagem hipsométrica da Figura 7a, juntamente com uma escala de cores que corresponde ao volume das árvores.

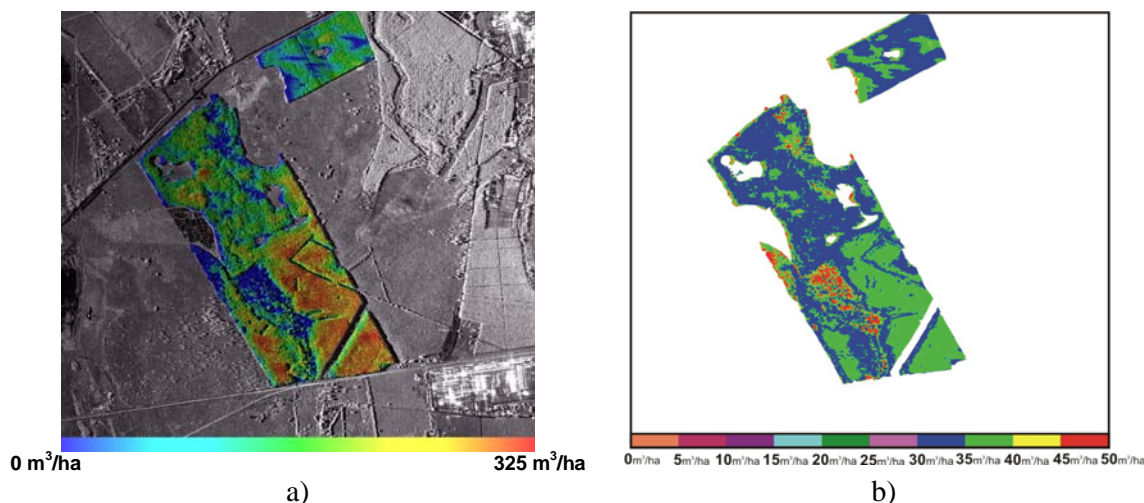


Figura 7 – Imagem: a) IHS (I=banda X, H=modelo Volume, S=50%); b) desvio padrão.

Verifica-se pelos gradientes de cor da imagem obtida, que os valores de volume variaram entre os valores de 0 a 325 m³/ha. As regiões da imagem com gradiente de cor azul correspondem a baixos valores de volume, decorrente das falhas do povoamento e com os erros na medida de LogHint.

A partir do modelo de regressão obtido foi possível gerar também uma imagem relativa ao desvio padrão do modelo do volume da vegetação empregando o método sugerido por Neter et al. (1996) para estimativa deste parâmetro a partir de novas observações.

A imagem resultante pode ser observada na Figura 7b, em que os níveis de cinza foram fatiados em 10 faixas de valores e associados a diferentes cores. Verifica-se que os desvios padrão predominantes foram nas faixas de 30 a 35 m³/ha e de 35 a 40 m³/ha; com alguns casos de desvios na faixa de 45 a 50 m³/ha nas áreas de grande ocorrência de falhas.

A faixa de desvio padrão de 30 a 40 m³/ha corresponde a um erro de estimativa na faixa de 16,1% a 21,47% para o volume médio das árvores do povoamento (186,33 m³/ha); para volume máximo das árvores de 318,13 m³/ha, o erro de estimativa corresponde a uma faixa de 9,43% a 12,57%.

5. Considerações finais

Os resultados obtidos indicaram que a radiometria na banda P, de maior penetração no dossel, não foi tão significativa quanto a interferometria empregando as bandas P e X para os modelos de regressão, uma vez que coerência da banda P_{VV} e o logaritmo da altura interferométrica, foram as variáveis selecionadas para os modelos desenvolvidos.

A provável razão para este efeito seria o fato de que o *Eucalyptus* tem um fuste ereto, com copa de pequeno porte, e os seus parâmetros biofísicos são estreitamente relacionados com a altura do indivíduo.

A polarização vertical foi utilizada por ser a mais significativa, devido a interação do feixe do radar ser maior com os troncos das árvores, que são os elementos estruturais dominantes da vegetação estudada.

O modelo da altura total empregou a altura interferométrica por inferir a altura do dossel a partir da utilização da diferença do DEM das bandas X e P_{VV}, e a coerência da banda P_{VV} nos modelos compensou a existência de falhas no dossel.

A resposta dos modelos desenvolvidos para o DAP e para altura total apresentou um resultado preditivo adequado, próximos dos valores médios do inventário, não ultrapassando o desvio padrão das medidas de campo.

O modelo gerado para o volume se aproximou dos dados de inventário, mas em alguns casos o resultado se distanciou do desvio padrão dos valores de campo, sendo que a maior diferença ocorrida se deve ao *outlier* detectado.

De forma geral, os modelos desenvolvidos apresentaram coeficientes de determinação na ordem de 84 a 88%, cujos resultados indicam grande potencialidade do uso dos modelos desenvolvidos que empregou a interferometria como suporte em inventários de grandes áreas, devido à rapidez de execução do mapeamento.

Como continuidade desta linha de pesquisa, está em tratamento os dados de uma nova missão realizada nessa mesma área de estudo para avaliação da capacidade de detecção de crescimento e de ganho de biomassa e volume.

Agradecimentos

Agradecemos as empresas Nobrecel Celulose e Papel S.A., Orbisat Aerolevantamentos S.A., Diâmetro Biometria e Inventário Florestal e a 5^a Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro, pelo apoio que permitiu a execução deste trabalho.

Referências

- Beaudoin, A., T. Le Toan, S. Goze, E. Nezry, A. Lopez, E. Mougin, C.C. Hsu, H.C. Han, J. Kong, and R.T. Shin. Retrieval of Forest Biomass from SAR Data. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.14, p.2777-2796, Sept. 1994.
- Gama F.F., Mura J. C., Almeida E. S., Gurgel P.C.A., Bins L. Aplicação de dados polarimétricos de radar aerotransportado (banda P) para estimativa de parâmetros estruturais de florestas tropicais. [CD-ROM] In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, 2005. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos, editado por Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 4413-4420.
- Gama, F. F. ; Santos, J.R. ; Mura, J.C. ; Rennó, C. D. **Estimation of biophysical parameters in the *Eucalyptus* stands by SAR data**. *Ambiência*, Guarapuava/PR, v. 2, p. 29 - 42, 20 out. 2006.
- Neff T. , Dutra L.V, Santos J.R., Freitas C.C., Araujo L.S. Tropical forest measurement by interferometric height modeling and P-band backscatter. **Forest Science**. Bethesda, MD, USA, v. 51, n. 6, p. 585-594, 2005.
- Neter, J., Kutner M.H., Nachtsheim, C.J., Wasserman, W. **Applied Linear Statistical Models**, Boston, MA, McGraw-Hill, 1996.
- Pope K.O., Rey-Benayas J.M., Paris J.F. Radar Remote Sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American Tropics. **Remote Sensing of Environment**, v.2, n. 48, p. 205-219, May 1994.
- Santos J.R., Freitas C.C., Araujo L.S., Dutra L.V., Mura J.C., Gama F.F., Soler L.S., Sant'Anna S.J.S. Airborne P-band SAR applied to the above ground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**. v.87, n.4, p.482-493, Nov. 2003.
- Mura J.C., Bins L.S., Gama F.F., Freitas C.C., Santos J.R., Dutra L.V. Identification of the Tropical Forest in Brazilian Amazon based on the MNT difference from P e X bands interferometric data. [CD-ROM] In: IGARSS - International Geoscience And Remote Sensing Symposium, Sidney, 2001 **Proceedings**. IEEE, Apr. 2001.